

УДК 621.91

Є. В. МИРОНЕНКО, д-р техн. наук,
В. В. КАЛІНІЧЕНКО, канд. техн. наук,
Д. Є. ГУЗЕНКО, Краматорськ, Україна

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ У СУЧАСНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ

У статті систематизовані основні шляхи забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки деталей у сучасному машинобудуванні, проаналізовані можливості та особливості їхньої реалізації.

Ключові слова: механічна обробка, енерговитрати, енергоефективність, умови процесу різання, оптимізація, критерій оптимізації процесу різання, енергоефективне обладнання

В статье систематизированы основные пути обеспечения энергоэффективности процессов механической обработки деталей в современном машиностроении, проанализированы возможности и особенности их реализации.

Ключевые слова: механическая обработка, энергозатраты, энергоэффективность, условия процесса резания, оптимизация, критерий оптимизации процесса резания, энергоэффективное оборудование

In the article the basic ways of ensure of energy efficiency of machining processes in a modern engineering are systematized. The prospects and features of implementation of these ways are analyzed.

Keywords: machining, energy consumption, energy efficiency, terms of cutting process, optimization, optimization criterion of cutting process, energy efficient equipment

Вступ. Постановка проблеми

Проблема ефективного використання енергоресурсів у промисловості набула в наш час надзвичайної гостроти. Навіть у індустріально розвинених країнах Європи частка надмірного енергоспоживання у промисловому секторі за даними роботи [1] складає 20–50 %. В Україні ж обсяг енергії, що витрачається на виробництво одиниці товарів та послуг, у 3,8 рази перевищує середнє значення для Європейського Союзу [2], що пояснюється застарілою технічною базою та низьким рівнем автоматизації виробництва, недосконалістю енергетичного менеджменту [3, 4]. Високий рівень енерговитрат на одиницю продукції, притаманний машинобудуванню України, негативно впливає на конкурентоздатність продукції вітчизняних заводів у порівнянні з продукцією провідних індустріальних країн [5]. Тому стратегічним напрямом підвищення конкурентоздатності продукції машинобудівних підприємств України є підвищення енергоефективності технологічних процесів, в першу чергу процесів механічної обробки деталей.

Аналіз досліджень та публікацій з проблеми, що розглядається

Проблема енергоефективності механічної обробки деталей розглядалась у роботах В. К. Старкова, С. С. Сіліна, Ф. Я. Якубова, А. В. Карпова, Д. Ю. Федориненка, В. С. Гусарєва, Л. Д. Малькової та інших вчених [3, 6–19]. У далекому зарубіжжі цій проблемі присвячені роботи таких авторів, як Т. Gutovski, N. Diaz, F. Draganescu, K. Grobmann та ін. [1, 20–22]. Різні вчені розглядали проблему забезпечення енергоефективності механічної обробки деталей з різних сторін, акцентуючи увагу як на виборі енергоефективних умов та параметрів обробки, так і на проектуванні та використанні енергоефективного верстатного обладнання.

Огляд невіршених частин проблеми

Актуальність та багатоаспектність проблеми забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки деталей у сучасному машинобудуванні зумовлює необхідність систематизації та всебічного аналізу шляхів вирішення цієї проблеми з метою виявлення перспектив та особливостей реалізації кожного з цих шляхів та розробки практичних рекомендацій з енергоефективної механічної обробки.

Мета статті – на основі аналізу даних наукових публікацій за досліджуваною темою систематизувати основні шляхи забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки у сучасному машинобудуванні, визначивши перспективи та особливості їхньої реалізації.

Основна частина

З метою систематизації шляхів забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки деталей у сучасному машинобудуванні був проведений аналіз наукових публікацій з досліджуваної тематики [1, 3, 5–24].

Структура витрат електроенергії, спожитої двигуном приводу головного руху (ПГР) верстата з електричної мережі, включає витрати енергії на стружкоутворення та формоутворення при різанні, втрати енергії у механічній частині ПГР верстата та втрати енергії у електродвигуні ПГР верстата [5]. Враховуючи різну природу енергетичних процесів у зоні різання, механічній та електричній частинах ПГР верстата, А. В. Карпов у роботах [10, 13] відзначає, що проблема підвищення енергоефективності процесу механічної обробки має вирішуватись за трьома напрямками:

- зниження витрат енергії у зоні різання за рахунок використання економічних умов та параметрів процесу різання;
- зниження втрат енергії у механічній частині ПГР верстата;
- зниження втрат енергії у електродвигуні ПГР верстата.

Наголошуючи на багатоетапності задачі забезпечення енергоефективності механічної обробки, А. В. Карпов у роботах [10, 13] пропонує розпочинати її вирішення з визначення енергоефективних

параметрів процесу різання, що відповідає першому з трьох вище перерахованих напрямів. Обґрунтовується це тим, що механічна робота, яка виконується інструментом у зоні різання та визначається закономірностями стружкоутворення, впливає на навантажувальні процеси у механічній частині ПГР верстата та встановлює, в кінцевому рахунку, загальну кількість енергії, спожитої двигуном ПГР верстата з електричної мережі.

У більшості з розглянутих робіт проблема енергоефективності механічної обробки деталей розглядається з точки зору забезпечення енергоефективних умов та параметрів процесу різання. Для цього пропонується використовувати оптимізаційні моделі процесу різання на базі різних енергетичних критеріїв оптимізації [5–7, 10–13, 17, 23].

Наприклад, у роботі [23] у якості критерію оптимізації процесу токарної обробки на важких верстатах використовується критерій мінімуму ефективної потужності N_{ef} різання ($N_{ef} = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 1020} \rightarrow \min$). Цей простий

у визначенні критерій відображає абсолютну величину енерговитрат на фізичні процеси у зоні різання, в той час як ефективність використання енергії при механічній обробці доцільніше оцінювати питомими показниками витрат енергії на видалення одиниці об'єму зрізаного шару або утворення одиниці площі обробленої поверхні. Ще одним недоліком цього критерію є неможливість його використання для оптимізації процесів обробки зі змінним значенням ефективної потужності різання [5].

У роботах В. К. Старкова [6] та А. В. Карпова [11] у якості критерію оптимізації високопродуктивних процесів обробки зі зняттям значних припусків рекомендується використовувати мінімум питомої енергомосткості різання (питомої роботи різання):

$$e = \frac{A_{piz}}{V} = \frac{N_{ef}}{\Pi_{piz}} = \frac{N_{ef}}{v \cdot S \cdot t} \rightarrow \min ,$$

де A_{piz} – робота різання; V – об'єм зрізаного шару; N_{ef} – ефективна потужність різання; Π_{piz} – продуктивність різання (зіом стружки за одиницю часу); v – швидкість різання; S – подача різця; t – глибина різання.

Питома енергомосткість різання, відображаючи рівень енерговитрат у зоні різання, що витрачаються на зняття заданого об'єму зрізаного шару, слугує фізичним показником ефективності процесу різання та характеризується такими перевагами, як [6, 10, 13]:

- універсальність та незалежність від характеру виробництва;
- простота визначення;

– доцільність використання для оптимізації умов різання у випадках, коли умовні екстремуми економічних критеріїв лежать на межі області припустимих значень оптимізовуваних параметрів.

Недоліками критерію питомої енергомісткості різання є [10, 13]:

– неможливість визначення величин «корисної» частини енергії, що витрачається на відокремлення одиниці об'єму зрізаного шару (чи утворення одиниці площі обробленої поверхні), та «шкідливої» частини енергії, що витрачається на перебіг механічних та фізико-хімічних процесів, що неминуче супроводжують стружко- та формоутворення при різанні;

– труднощі у порівнянні рівня енергії у зоні різання з граничним енергетичним станом оброблюваного матеріалу, який визначається його фізико-механічними та теплофізичними властивостями;

– можливість використання критерію тільки за умов ізотропії оброблюваного матеріалу по перетину зрізаного шару та стружки;

– можливість використання критерію тільки для обробки з постійним значенням ефективної потужності різання ($N_{ef} = const$).

Альтернативні енергетичні критерії оптимізації процесу різання, запропоновані у роботах [6, 10, 11, 13], базуються на врахуванні співвідношення «корисної» та «шкідливої» частин енергії у загальній структурі енерговитрат у зоні різання, що визначається на основі закономірностей енергетичного (термодинамічного) підходу до процесу різання [6, 9, 11].

Одним з таких критеріїв оптимізації, позбавленим недоліків критерію питомої енергомісткості різання, є запропонований у роботах [10, 13] енергетичний коефіцієнт корисної дії (енергетичний ККД) процесу різання:

$$K = \frac{\Delta w \cdot V}{n_u \cdot A_u} = \frac{\Delta w \cdot V}{n_u \cdot \int_0^{\tau_u} N(\tau) d\tau},$$

де Δw – питома енергомісткість оброблюваного матеріалу; V – об'єм зрізаного шару оброблюваного матеріалу; n_u – число циклів зміни потужності різання $N(\tau)$ за час робочого ходу інструменту; A_u – робота різання за час τ_u одного циклу зміни потужності різання.

Величина A_u для різних закономірностей зміни потужності різання у часі визначається за рекомендаціями робіт [10, 13], наведеними у таблиці 1.

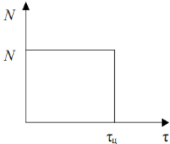
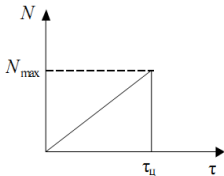
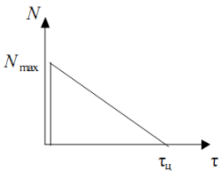
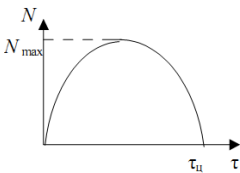
Питому енергомісткість оброблюваного матеріалу Δw у роботах [10, 13] запропоновано трактувати як критичну зміну внутрішньої енергії одиниці

об'єму матеріалу, тобто різницю між граничним $[u]$ та початковим u_0 рівнями об'ємної щільності внутрішньої енергії:

$$\Delta w = [u] - u_0.$$

В основу визначення величини Δw у згаданих роботах покладено енергетичну концепцію руйнування матеріалу. Тіло вважається зруйнованим,

Таблиця 1 – Типові схеми зміни потужності різання у часі для різних процесів механічної обробки (за роботою [13])

Закономірність зміни потужності різання за час одного циклу	Схема зміни потужності різання за час одного циклу	Робота різання за час одного циклу зміни потужності різання
Схема 1: постійна потужність різання. Приклади – поздовжнє точіння та розточування		$A_{\tau} = N \cdot \tau_{\tau}$
Схема 2: монотонне зростання потужності різання до максимального значення з наступним інтенсивним спадом. Приклад – однобічне зустрічне фрезерування		$A_{\tau} = \frac{1}{2} \cdot N_{\max} \cdot \tau_{\tau} = N_{\text{сеп}} \cdot \tau_{\tau}$
Схема 3: інтенсивне зростання потужності різання до максимального значення з наступним монотонним спадом. Приклади – поперечне точіння, однобічне попутне фрезерування		
Схема 4: зміна потужності за параболічним законом. Приклади – розрізання, двобічне торцеве та кінцеве фрезерування		$A_{\tau} = \frac{2}{3} \cdot N_{\max} \cdot \tau_{\tau} = \frac{4}{3} \cdot N_{\text{сеп}} \cdot \tau_{\tau}$

якщо хоча б у одному його локальному об'ємі щільність внутрішньої енергії зросла до граничної величини $[u]$. При цьому питому енергомісткість оброблюваного матеріалу пропонується визначати для різних процесів різання з різних позицій, з урахуванням різного механізму руйнування матеріалу (таблиця 2) [13]. Для чистової обробки розрахунок Δw виконується з урахуванням теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу [13]. При чорновій та напівчистовій обробці вигляд розрахункової формули для визначення величини Δw [10, 13] залежить від типу утворюваної стружки, що зумовлено механізмом та інтенсивністю деформації матеріалу зрізаного шару.

Таблиця 2 – Вирази для визначення питомої енергомісткості оброблюваного матеріалу при лезовій механічній обробці [10, 13]

Умови обробки	Вираз для визначення питомої енергомісткості оброблюваного матеріалу
Чистова обробка з утворенням зливної стружки при товщинах зрізаного шару до 0,1–0,5 мм та швидкостях різання від 300 м/хв	$\Delta w = C_p \cdot \rho \cdot (T_S - T_0)$
Чорнова та напівчистова обробка матеріалів з утворенням суглобчастої або елементної стружки	$\Delta w = \tau_p \cdot \varepsilon = \frac{1,5 \cdot \sigma_\varepsilon}{1 - 1,7 \cdot \psi_\varepsilon}$
Чорнова та напівчистова обробка крихких матеріалів з утворенням стружки надламу	$\Delta w = \int_0^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \approx \frac{1}{2} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \delta$

Пояснення до таблиці: C_p , ρ – середня питома теплоємність та щільність оброблюваного матеріалу; T_S , T_0 – температура плавлення та початкова температура оброблюваного матеріалу; $\tau_p = \frac{0,6 \cdot \sigma_\varepsilon}{1 - 1,7 \cdot \psi_\varepsilon}$ – опір оброблюваного матеріалу пластичному зсуву; ε – відносний зсув (для оброблюваних матеріалів, що утворюють елементну та суглобчасту стружку, $\varepsilon = 2,5$); σ_ε – межа міцності оброблюваного матеріалу на розтяг; ψ_ε – рівномірне відносне поперечне звуження оброблюваного матеріалу; ε_p – критичне значення відносної деформації оброблюваного матеріалу, δ – відносне подовження оброблюваного матеріалу при розтягу

Енергетичний ККД процесу різання зводиться до цільової функції $K \rightarrow \max$, аргументами якої може бути велика кількість керованих та вхідних факторів системи різання (характеристики оброблюваного та інструментального матеріалів, геометричні параметри інструменту, елементи режиму різання). Виконання умови $K \rightarrow \max$ на попередніх стадіях механічної обробки відповідає таким оптимальним значенням керованих факторів системи різання, при яких за рахунок мінімально необхідних енерговитрат будуть забезпечені потрібні продуктивність обробки та стійкість інструменту. Виконання умови $K \rightarrow \max$ на кінцевих стадіях обробки відповідає таким оптимальним значенням керованих факторів системи різання, при яких за рахунок мінімально необхідних енерговитрат будуть забезпечені необхідні показники якості обробленої поверхні деталі.

Згідно з [11], питома енергомісткість різання характеризує рівень фактичних руйнуючих напружень, що виникають при заданих режимах різання та викликають відокремлення необхідного об'єму зрізуваного шару. При вираженні питомої енергомісткості різання у мегапаскалях (МПа) та співвіднесенні її з межею міцності $\sigma_{\text{в}}$ оброблюваного матеріалу на розтяг, тобто рівнем напружень, достатніх для руйнування об'єму оброблюваного матеріалу, отримуємо ще один оптимізаційний енергетичний критерій процесу різання – безрозмірний енергетичний критерій для оптимізації процесів чорнової обробки [11]:

$$q_{\text{чорн}} = \frac{\sigma_{\text{в}}}{e}.$$

При чистовій обробці деталей оцінка співвідношення «корисної» енергетичної складової та загальної величини питомої роботи різання може бути представлена у вигляді енергетичного критерію якості [6]:

$$\eta_2 = \frac{U_c}{v \cdot S} \rightarrow \min,$$

де U_c – прихована енергія деформування поверхневого шару деталі, Дж; v – швидкість різання, м/хв; S – подача, мм/об.

У загальному балансі роботи різання $A_{\text{різ}}$ частка енергії U_c не перевищує 1%, але, оскільки запасена внутрішня енергія охоплює значно менші об'єми, ніж теплота, що виділяється при різанні, питомі величини U_c стають значними, справляючи помітний вплив на глибину зміцненого шару поверхні деталі, модуль та знак залишкових поверхневих напружень, опір втомі, корозійну стійкість поверхневого шару матеріалу деталі тощо [11].

Розрахунок значення U_c має теоретико-експериментальний характер та передбачає проведення серії трудомістких досліджень, що ускладнює його

використання у реальних виробничих умовах. Альтернативним критерієм енергоефективності чистової обробки деталей, на погляд автора роботи [11], може бути безрозмірний енергетичний критерій у вигляді:

$$q_{\text{чист}} = \frac{U_{\text{різ}}}{A_{\text{різ}}} \rightarrow \min ,$$

де $U_{\text{різ}}$ – корисна робота диспергування при різанні; $A_{\text{різ}}$ – сумарна робота різання, здійснювана інструментом.

Оцінка енергії $U_{\text{різ}}$ здійснюється на основі аналізу процесу пластичного деформування у зоні різання та ролі, яку відіграє при цьому генерування та рух дефектів кристалічної будови оброблюваного матеріалу [11].

Енергетичний ККД процесу різання K та безрозмірні енергетичні критерії $q_{\text{чорн}}$, $q_{\text{чист}}$, запропоновані у роботах [10, 11, 13], дозволяють оцінити частку енерговитрат у зоні різання, що витрачається на виконання «корисної» складової роботи різання при стружко- та формоутворенні та на перебіг супроводжуючих фізичних процесів, що ініціюють зношування інструменту та деформацію поверхневого шару деталі («шкідливу» складову роботи різання). Критерії K , $q_{\text{чорн}}$, $q_{\text{чист}}$ можуть бути використані для виявлення резервів підвищення частки «корисної» складової роботи різання у енергетичному балансі зони різання.

В. С. Гусаревим та Ю. В. Яровим запропоновано критерій дії технологічної системи [17]:

$$D = N \cdot T^2 \rightarrow \min ,$$

де N – потужність різання; T – час обробки.

Цей критерій має перспективу використання для порівняння енергоефективності різних методів обробки, в тому числі принципово різної фізичної природи. Разом з тим, доцільність використання критерію дії в оптимізаційних моделях для визначення енергоефективних умов механічної обробки наразі не простежується.

У таблиці 3 систематизовані приклади запропонованих у наукових публікаціях за досліджуваною тематикою критеріїв оптимізації процесів механічної обробки, пов'язаних з рівнем енерговитрат при різанні.

Відзначимо, що можливість забезпечення високої енергоефективності процесу механічної обробки за рахунок технологічних факторів не обмежується оптимізацією режимів різання за наведеними у таблиці 3 енергетичними критеріями.

Наприклад, у роботі Л. Д. Малькової [18] досліджувався вплив припуску на обробку та його розсіювання на величину енергоспоживання при обточуванні вивоків для деталей автомобільної промисловості. Встановлено, що виключення значень припусків, які перевищують рекомендований розрахунковий діапазон, скорочує енергоспоживання на 6 %. У іншій роботі Л. Д. Малькової [19] отримані залежності енергоспоживання від площі поверхні різання при циліндричному та торцевому фрезеруванні. Незалежно від способу фрезерування зі збільшенням площі поверхні різання енергоспоживання стійко зростає, а зміна цієї площі може бути досягнута як зміною параметрів режиму різання, так і зміною схеми зняття припуску. Це дає автору роботи підставу використовувати розрахункову площу

Таблиця 3 – Приклади критеріїв оптимізації процесів механічної обробки, пов'язаних з рівнем енерговитрат при різанні

Найменування критерію оптимізації	Вираз для визначення критерію оптимізації	Загальний вигляд цільової функції	Літературне джерело
Ефективна потужність різання N_{ef} , кВт	$N_{ef} = \frac{P_z \cdot v}{60 \cdot 1020}$	$N_{ef} \rightarrow \min$	[23]
Питома енергомідність різання e , Вт·хв/мм ³	$e = \frac{N_{ef}}{v \cdot S \cdot t}$	$e \rightarrow \min$	[6, 11]
Енергетичний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу різання K	$K = \frac{\Delta w \cdot V}{\tau_y \cdot n_y \cdot \int_0 N(\tau) d\tau}$	$K \rightarrow \max$	[10, 13]
Безрозмірний енергетичний критерій $q_{чорн}$ для чорнової обробки	$q_{чорн} = \frac{\sigma_\varepsilon}{e}$	$q_{чорн} \rightarrow \max$	[11]
Безрозмірний енергетичний критерій $q_{чист}$ для чистової обробки	$q_{чист} = \frac{U_{piз}}{A_{piз}}$	$q_{чист} \rightarrow \min$	[11]
Енергетичний критерій якості η_2	$\eta_2 = \frac{U_c}{V \cdot S}$	$\eta_2 \rightarrow \min$	[6]
Критерій дії технологічної системи D , Дж·хв ³	$D = N \cdot T^2$	$D \rightarrow \min$	[17]

Пояснення до таблиці: P_z – тангенціальна складова сили різання; v – швидкість різання; S – подача; t – глибина різання; Δw – питома енергомісткість оброблюваного матеріалу; V – об'єм оброблюваного матеріалу; $n_{\text{ц}}$ – число циклів зміни потужності різання $N(\tau)$ за одиницю часу робочого ходу інструменту; $\tau_{\text{ц}}$ – час одного циклу зміни потужності різання; $\sigma_{\text{в}}$ – межа міцності оброблюваного матеріалу на розтяг; $U_{\text{різ}}$ – корисна робота диспергування при різанні; $A_{\text{різ}}$ – сумарна робота різання, здійснювана інструментом; $U_{\text{С}}$ – прихована енергія деформування поверхневого шару деталі; N – потужність різання; T – час обробки

поверхні різання у якості критерію при прогнозуванні енергоспоживання при фрезеруванні.

З іншого боку розглядається проблема забезпечення енергоефективності механічної обробки у роботах Д. Ю. Федориненка та співавторів [14–16]. У цих роботах акцентується увага на проектуванні та використанні енергоефективного верстатного обладнання. Так, у роботі [14] запропоновано методологію підвищення енергоефективності верстатів на основі системного підходу до проектування конструкцій, що дозволяє аналізувати елементи та підсистеми верстату та їхні взаємозв'язки у межах заданої ієрархічної структури та на основі проведеного аналізу синтезувати енергоефективні проектні рішення. Під час проектування верстатів виділяють два взаємопов'язані ієрархічні рівні:

- рівень машини (загальні вимоги щодо технічного рівня, вхідні та вихідні параметри процесу обробки, експлуатаційне середовище тощо);
 - рівень підсистем (привод головного руху, приводи подач тощо).
- Аналіз елементів та підсистем верстата передбачає:
- аналіз енергетичних потоків верстата у просторі та часі;
 - виявлення процесів та підсистем, що характеризуються значним енергоспоживанням;
 - аналіз енергетичних втрат у підсистемах верстата за паспортними даними, теоретичними залежностями та результатами експериментів;
 - побудову узагальненого енергетичного балансу для виявлення «вузьких» місць системи, що характеризуються значним енергоспоживанням.

Синтез енергоефективних проектних рішень підсистем верстата у роботі [14] пропонується розпочинати з розроблення математичних моделей (як правило, чисельного моделювання) та експериментальних досліджень механізмів і підсистем верстата зі значним енергоспоживанням.

Серед запропонованих у роботі [14] перспективних шляхів зменшення втрат енергії у електричній частині приводів верстата відзначимо:

- використання енергоефективних двигунів (частотно-регульованих стандарту IE3, синхронних, безщіткових двигунів постійного струму, серводвигунів) у приводах верстатів;

- правильний вибір номінальної потужності електродвигунів приводів верстатів (максимальна ефективність досягається у діапазоні 70–100 % від навантаження);

- вдосконалення конструкції електродвигунів приводів верстатів (використання міді замість алюмінію, зменшення зазорів, зменшення втрат на тертя у підшипниках).

На особливому місці серед шляхів зменшення втрат енергії у електричній частині ПГР верстата знаходиться впровадження систем компенсації реактивної складової споживаної електроенергії. У роботі [24] представлено автоматизовану систему управління енергоспоживанням верстата за допомогою автоматичної компенсації реактивної складової споживаної енергії, що виникає за рахунок недовантаження електродвигуна ПГР. Запропонований спосіб компенсації реактивної складової споживаної енергії дозволяє збільшити величину коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ у 1,5–2 рази, і знизити таким чином енерговитрати на механічну обробку без втручання безпосередньо до самого технологічного процесу.

Серед запропонованих у роботах [14, 15] перспективних шляхів зменшення втрат енергії у механічній частині приводів верстата відзначимо:

- впровадження вдосконалених конструкцій шпиндельних опор;
- зменшення мас деталей вузлів тертя;
- підвищення зносостійкості деталей вузлів тертя;
- підвищення ефективності гідросистем верстатів з метою зменшення втрат тиску у опорах;
- підвищення точності, жорсткості та теплостійкості деталей верстатних вузлів.

Важливе місце у сучасних верстатних комплексах посідають системи числового програмного керування (ЧПК). Підвищення ефективності систем ЧПК з метою мінімізації енергоспоживання при одночасному забезпеченні високої продуктивності обробки передбачає раціональне налагодження верстата на базі вибору ефективних стратегій обробки деталей у часі (протягом робочої зміни, тижня, місяця) та у робочій зоні верстата (оптимізацію траєкторій обробки, зменшення кількості інструментів, необхідних для обробки, частоти змін інструменту тощо), а також впровадження систем постійного моніторингу енергоспоживання на основі використання сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів [14, 16].

У якості шляхів зниження енерговитрат на механічну обробку можна назвати також назвати покращення якості догляду за обладнанням та вдосконалення енергетичного менеджменту на підприємстві.

Висновки

У статті на основі аналізу даних наукових публікацій систематизовані основні шляхи забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки у сучасному машинобудуванні. Були виділені шляхи забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки за рахунок технологічних факторів (оптимізація процесу обробки за критеріями, пов'язаними з рівнем енерговитрат при різанні, призначення раціональної величини та схеми зняття припуску), використання енергоефективних двигунів та систем компенсації реактивної складової споживаної електроенергії з метою зменшення втрат енергії у електричній частині приводів верстата, вдосконалення конструкцій вузлів та механізмів верстата з метою зменшення втрат енергії у них, підвищення ефективності систем ЧПК та впровадження систем постійного моніторингу енергоспоживання. Визначені перспективи та особливості реалізації окремих шляхів забезпечення енергоефективності механічної обробки.

Список використаних джерел: 1. *Gutovski, T.* Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes / *T. Gutovski, J. Dahmus, A. Thiriez* // 13th CIRP Conference of Life Cycle Engineering, Lueven, May 31st – June 2nd, 2006. – P. 1–5. 2. *Maissner, F.* Pdivyshchennia enerhoefektyvnosti v Ukraini: zmenshennia rehuliuivannia ta stymuliuvannia enerhozberezhennia [Elektronnyi resurs] / *F. Maissner, D. Naumenko, Y. Radeke*. – Rezhym dostupu : http://www.ier.com.ua/ua/publications/consultancy_work/archive_2012/?pid=3348. 3. *Федориненко, Д. Ю.* Методика аналізу енергоефективності процесів механічної обробки на токарних верстатах / *Д. Ю. Федориненко, О. П. Космач, С. П. Сапон, Б. В. Цеков* // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2016) : матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції (26–29 квітня 2016 р., м. Чернігів). – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – С. 105. 4. *Соловцов, С. С.* Приоритетные направления совершенствования производства точных коротких заготовок из сортового проката / *С. С. Соловцов* // Кузнечно-штамповочное производство. – М. : Машиностроение, 1990. – № 7. – С. 8–11. 5. *Мироненко, Е. В.* Стратегия определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения / *Е. В. Мироненко, В. В. Калиниченко* // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 83–95. 6. *Старков, В. К.* Физика и оптимизация резания материалов / *В. К. Старков*. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с. – ISBN 978-5-94275-460-0. 7. *Старков, В. К.* Оптимизация процесса резания по энергетическим критериям / *В. К. Старков, М. В. Киселев* // Вестник машиностроения, 1989. – № 4. – С. 41–45. 8. *Силин, С. С.* Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критериям / *С. С. Силин, А. В. Баранов* // Станки и инструменты. – 1999. – № 1. – С. 16–17. 9. *Якубов, Ф. Я.* Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов / *Ф. Я. Якубов*. – Ташкент: «Фан», 1985. – 104 с. 10. *Карпов, А. В.* К вопросу снижения энергоемкости технологических процессов обработки резанием / *А. В. Карпов* // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. 11. *Карпов, А. В.* Об оценке энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием / *А. В. Карпов* // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 2. – С. 61–68. 12. *Карпов, А. В.* Оптимизация процессов обработки резанием на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения материалов / *А. В. Карпов* // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 58–63. 13. *Карпов, А. В.* Показатели энергетической эффективности процесса резания / *А. В. Карпов* // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. Том 14. № 1. 2012. Пермь : Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2012. – С. 51–59.

14. Федориненко, Д. Ю. Энергоэффективность обробних верстатів / Д. Ю. Федориненко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник. – Чернігів: Черніг. цац. технол. ун-т, 2015. – № 2 (78). – С. 64–70.
15. Федориненко, Д. Ю. Зменшення втрат енергії у високошвидкісних гідростатодинамічних опорах шпинделя / Д. Ю. Федориненко, А. А. Урліна, Є. В. Аванесов // Scientific journal «ScienceRise». Технічні науки. – № 6 (2)/11, 2015. – С. 99–103.
16. Федориненко, Д. Ю. Інформаційно-вимірювальний комплекс визначення електричного споживання асинхронних двигунів верстатів / Д. Ю. Федориненко, А. П. Космач // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»: науковий збірник. – Чернігів: Черніг. цац. технол. ун-т, 2015. – № 2 (78). – С. 70–75.
17. Гусарев, В. С. Экспериментальное исследование зависимости действия технологической системы от режимов формообразования / В. С. Гусарев, Ю. В. Яровой // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. № 7 (104). – С. 12–16.
18. Малькова, Л. Д. Влияние величины припуска поковок на энергоёмкость механической обработки / Л. Д. Малькова // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 10. – С. 65–73. DOI 10.7463/1015/0815492.
19. Малькова, Л. Д. Оценка энергопотребления при механической обработке поверхностей различными способами фрезерования / Л. Д. Малькова // Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1559>.
20. Diaz, N. Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use / N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld // Sustainability in Manufacturing. – Energy Efficiency in Machine Tool. – 2011. – P. 263–267.
21. Draganescu, F. Models of machine tool efficiency and specific consumed energy / F. Draganescu, M. Gheorghe, C. V. Doicin // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 141. – P. 9–15.
22. Grobmann, K. Thermo-energetic Desing of Machine Tools / K. Grobmann. – Springer International Publishing, 2015. – 261 p.
23. Мироненко, Е. В. Оптимизация режимов резания при обработке на тяжелых токарных станках с учетом энергозатрат / Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко, Л. В. Васильева, О. Е. Мироненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – № 40. – С. 62–70.
24. Михайлов, И. Н. Автоматизированная система управления энергоёмкостью машиностроительных технологических процессов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.13.06. М., 2011.

Bibliography (transliterated): 1. Gutovski, T. Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes / T. Gutovski, J. Dahmus, A. Thiriez // 13th CIRP Conference of Life Cycle Engineering, Lueven, May 31st – June 2nd, 2006. – P. 1–5. 2. Maissner, F. Pidvyshchennia enerhoeffektyvnosti v Ukraini: zmnshennia rehuliuivannia ta stymuliuivannia enerhoberezhennia [Elektronnyi resurs] / F. Maissner, D. Naumenko, J. Redeke. – Rezhym dostupu: http://www.ier.com.ua/ua/publications/consultancy_work/archive_2012/?pid=3348. 3. Fedorynenko, D. Yu. Metodyka analizu enerhoeffektyvnosti protsesiv mekhanichnoi obrobky na tokarnykh verstatakh / D. Yu. Fedorynenko, O. P. Kosmach, S. P. Sapon, B. V. Tsekov // Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZLaTPS–2016): materialy tez dopovidei VI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (26–29 kvitnia 2016 r., m. Chernihiv). – Chernihiv: ChNTU, 2016. – S. 105. 4. Solovtsov, S. S. Prioritetnyye napravleniya sovershenstvovaniya proizvodstva tochnykh korotkikh zagotovok iz sortovogo prokata / S. S. Solovtsov // Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo. – M.: Mashinostroyeniye. 1990. – № 7. – S. 8–11. 5. Mironenko, E. V. Strategiya opredeleniya energoeffektivnykh tekhnologicheskikh parametrov tokarnoy obrabotki detaley tyazhelogo mashinostroyeniya / E. V. Mironenko, V. V. Kalinichenko // Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh: Mezhdunar. nauch.-tekhn. sb. – Kharkov: NTU «KhPI». 2016. – Vyp. 86. – S. 83–95. 6. Starkov, V. K. Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov / V. K. Starkov. – M.: Mashinostroyeniye. 2009. – 640 s. – ISBN 978-5-94275-460-0. 7. Starkov, V. K. Optimizatsiya protsessa rezaniya po energeticheskim kriteriyam / V. K. Starkov, M. V. Kiselev // Vestnik mashinostroyeniya. 1989. – № 4. – S. 41–45. 8. Silin, S. S. Optimizatsiya operatsiy mekhanicheskoy obrabotki po energeticheskim kriteriyam / S. S. Silin, A. V. Baranov // Stanki i instrumenty. – 1999. – № 1. – S. 16–17. 9. Yakubov, F.

Ya. Energeticheskiye sootnosheniya protsessa mekhanicheskoy obrabotki materialov / F. Ya. Yakubov. – Tashkent: «Fan». 1985. – 104 s. **10. Karpov, A. V.** K voprosu snizheniya energoyemkosti tekhnologicheskikh protsessov obrabotki rezaniyem / A. V. Karpov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 2. **11. Karpov, A. V.** Ob otsenke energeticheskoy effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov obrabotki rezaniyem / A. V. Karpov // Mashinostroyeniye i bezopasnost zhiznedeyatelnosti. – 2014. – № 2. – S. 61–68. **12. Karpov, A. V.** Optimizatsiya protsessov obrabotki rezaniyem na osnove energeticheskikh zakonomernostey deformatsii i razrusheniya materialov / A. V. Karpov // Mashinostroyeniye i bezopasnost zhiznedeyatelnosti. – 2012. – № 1. – S. 58–63. **13. Karpov, A. V.** Pokazateli energeticheskoy effektivnosti protsessa rezaniya / A. V. Karpov // Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye. materialovedeniye. Tom 14. № 1. 2012. Perm : Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. 2012. – S. 51–59. **14. Fedorynenko, D. Yu.** Enerhoefektyvnost obrobnykh verstativ / D. Yu. Fedorynenko // Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» : naukovyi zbirnyk. – Chernihiv : Chernih. tsats. tekhnol. un-t, 2015. – № 2 (78). – S. 64–70. **15. Fedorynenko, D. Yu.** Zmenshennia vtrat enerhii u vysokoshvydkisnykh hidrostatomichnykh oporakh shpyndelia / D. Yu. Fedorynenko, A. A. Urlina, Ye. V. Avanesov // Scientific journal «ScienceRise». Tekhnichni nauky. – № 6 (2)/11, 2015. – S. 99–103. **16. Fedorynenko, D. Yu.** Informatsiino-vymiriuvalniy kompleks vyznachennia elektrychnoho spozhyvannia asynkhronnykh dyuhuniv verstativ / D. Yu. Fedorynenko, A. P. Kosmach // Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» : naukovyi zbirnyk. – Chernihiv : Chernih. tsats. tekhnol. un-t, 2015. – № 2 (78). – S. 70–75. **17. Gusarev, V. S.** Eksperimentalnoye issledovaniye zavisimosti deystviya tekhnologicheskoy sistemy ot rezhimov formoobrazovaniya / V. S. Gusarev. Yu. V. Yarovoy // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2013. № 7 (104). – S. 12–16. **18. Malkova, L. D.** Vliyaniye velichiny pripuska pokovok na energoyemkost mekhanicheskoy obrabotki / L. D. Malkova // Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N. E. Bauman. Elektron. zhurn. – 2015. – № 10. – S. 65–73. DOI 10.7463/1015/0815492. **19. Malkova, L. D.** Otsenka energopotrebleniya pri mekhanicheskoy obrabotke poverkhnostey razlichnymi sposobami frezerovaniya / L. D. Malkova // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. 2016. vyp. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-12-1559>. **20. Diaz, N.** Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use / N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld // Sustainability in Manufacturing. – Energy Efficiency in Machine Tool. – 2011. – P. 263–267. **21. Draganescu, F.** Models of machine tool efficiency and specific consumed energy / F. Draganescu, M. Gheorghe, C. V. Doicin // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 141. – P. 9–15. **22. Grobmann, K.** Thermo-energetic Desing of Machine Tools / K. Grobmann. – Springer International Publishing, 2015. – 261 p. **23. Mironenko, E. V.** Optimizatsiya rezhimov rezaniya pri obrabotke na tyazhelykh tokarnykh stankakh s ucheto energozatrat / E. V. Mironenko, V. S. Guzenko, L. V. Vasilyeva, O. E. Mironenko // Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskiy politekhnichniy institut». Zbirnik naukovikh prats. Temachniy vipusk : Tekhnologii v mashinobuduvanni. Kharkiv : NTU «KhPI». – 2010. – № 40. – S. 62–70. **24. Mikhaylov, I. N.** Avtomatizirovannaya sistema upravleniya energoyemkostyu mashinostroitelnykh tekhnologicheskikh protsessov : avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.06. M.. 2011.